心理科学进展 2023, Vol. 31, No. 3, 338–349
Advances in Psychological Science

https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2023.00338

·研究构想(Conceptual Framework)·

不确定是坏的么？不确定状态中的错误加工特点及其解释机制*

杨 庆 李亚琴

(曲阜师范大学心理学院, 山东 曲阜 273165)

摘 要 错误是人类决策和行为过程中在所难免的。然而, 错误常常带来不利后果甚至危及生命(如高危作业时的失误)。如何有效监控错误并优化行为对于个体生存和发展至关重要。错误的发生受到内部心理状态影响, 个体常在不确定的情境中做出判断, 不确定状态增强还是削弱错误监控, 是一个重要科学问题, 却存在矛盾结果。在前期积累和理论分析基础上, 本项目拟从人格差异角度探索不确定容忍度的调节作用。不确定容忍度的差异意味着个体对于模糊情境的耐受性和错误的敏感性不同, 因而可能调节不确定状态中的错误加工过程。研究 1 采用行为实验, 揭示多种不确定情境中(如奖赏/惩罚)错误监控和错误后调整的认知特点, 考察不确定容忍度的调节作用; 研究 2 通过考察电生理表征、时间加工进程和神经振荡机制等进一步解释这些现象。本项目对于探明不确定状态中的错误加工规律及其人格调节机制具有重要理论价值, 对于促进个体的环境适应、目标达成等具有较好现实意义。

关键词 错误加工, 不确定, 人格, 不确定容忍度, 认知控制
分类号 B842

1 问题提出

“人谁无过, 过而能改, 善莫大焉。”错误是人们在决策和行为过程中难以避免的。然而, 错误会产生负面影响(如考试失利、实验失败、投资受损等), 甚至严重后果(如高速驾驶时方向偏离、高危作业等)。如何有效监控错误并调整行为对于个体生存与发展、环境适应以及目标达成等具有显著现实意义。

个体时常在不确定的情境中做出选择(例如飞行员在复杂变化的天气中驾驶, 投资者在损益不明的情况下投资), 不确定状态如何影响错误发生, 目前的研究尚有争议。一些研究发现不确定环境能够增强错误监控强度, 降低错误率(Jackson et al., 2015; Speed et al., 2017); 然而, 另一些研究却发现不确定状态对错误监控和错误率没有显著影响(Willems et al., 2021), 甚至降低错误监控强度(White et al., 2018)。如何解释这些矛盾结论, 是一个有价值的科学问题, 具有重要的理论意义。

通过分析和比较, 产生上述问题的一个重要原因是未能充分考虑人格差异性。不确定容忍度(intolerance of uncertainty)是一种稳定的人格特质, 影响个体对于不确定情境的敏感性, 进而可能调节错误加工过程。研究表明, 难以忍受不确定的个体容易将模糊信息视为威胁, 对于不确定环境具有更高的警觉和防御反应(Carleton, 2016; Tanovic et al., 2018)。同时, 不确定容忍度与错误敏感性也有关联, 能够预测错误监控程度的变化(Jackson et al., 2016)。因此, 不确定容忍度可能调节不确定状态与错误加工的关系。

基于此, 本项目拟从人格差异角度, 结合成熟的不确定诱导范式, 探索不确定状态中的错误

收稿日期: 2022-04-06
* 国家自然科学基金青年项目(32100872); 山东省高等学校“青创团队计划”项目(2022RW038)。
通信作者: 杨庆, E-mail: yq99550@gmail.com

加工特点、神经表征和调节机制。具体来说, 研究 1 通过设置多类不确定情境(如奖赏不确定、惩罚不确定)揭示错误加工过程的认知行为特征(如错误监控、错误后调整), 并探索不确定容忍度的调节作用; 在此基础上, 研究 2 系统揭示不确定情境中错误加工的神经表征(如错误相关负波、错误正波)、时间进程和神经振荡机制(如 alpha 波)。

2　国内外研究现状与分析

2.1　错误加工及其神经基础

错误加工(error processing)是个体实现目标的一种必需的高级认知功能, 是认知控制的核心成分之一(Kerns et al., 2004)。错误加工包括错误监控(error monitoring)与错误后调整(post-error adjustment)两个子过程(Hajcak, 2012)。错误监控是指对快速反应中偏离目标的行为的识别和监测(Ullsperger et al., 2014), 它是产生行为调整的前提(Fu et al., 2019)。当个体犯错时, 会在接下来的试次中进行调节, 可能出现错误后减慢(post-error slowing)和错误后正确率提升(post-error improvement in accuracy)等错误后调整现象(Ullsperger et al., 2014)。

脑成像研究表明错误监控与错误后调整的功能分别定位于前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)和外侧前额叶(lateral prefrontal cortex, LPFC), 其中 ACC 负责冲突检测和行为监控, 当实际反应与正确反应不一致时, ACC 将冲突信号传递到 LPFC, 通过提升认知控制水平实现行为校准(Ridderinkhof et al., 2004)。

脑电研究主要揭示了错误监控的神经心理表征: 错误相关负波(error-related negativity, ERN)和错误正波(error positivity, Pe)。ERN 是个体做出快速、冲动性错误后的 100 ms 内出现的负偏转电位(Falkenstein et al., 1991)。在 ERN 峰后的 200~250 ms 通常出现一个正偏转慢波, 即错误正波(Falkenstein et al., 2000)。二者主要产生于前扣带回(Fu et al., 2019)。通常认为 ERN 不受错误意识影响, 而 Pe 主要在意识到犯错时才出现(Dehaene, 2018; 韩明秀, 贾世伟, 2016)。尽管功能意义方面存在多种理论解释(综述见: 刘春雷, 张庆林, 2009), 但基本共识是, ERN/Pe 表征错误发生的警觉信号, 促使个体采取认知控制和行为校正等方式避免错误(Hajcak, 2012; Ullsperger et al., 2014)。一些研究表明, 错误导致的 ERN、Pe 能够预测错误后调整效应(如错误后变慢、正确率提升) (Imburgio et al., 2020; Kerns et al., 2004)。由于个体不能每次都成功觉察到错误, 一些研究发现意识到 vs.未意识的错误其监控和调整过程并不相同(王丽君 等, 2020)。例如, 意识到 vs.未意识到错误后被试的调整速度不同; 时频分析发现意识到相较于未意识到的错误诱发更强的 alpha 波(8~14 Hz)能量, 表明意识到的错误有更强的注意警觉和控制(王丽君 等, 2020)。

错误加工与认知控制的其他子成分既有密切联系, 也有特殊性。根据一些学者, 除了错误加工之外, 认知控制(cognitive control)还包括抑制控制、任务转换和工作记忆等子成分(Gratton et al., 2018)。抑制控制(inhibitory control)主要涉及对冲突信息的加工(如色−词冲突检测)和对优势反应的抑制(如在小概率的 Stop 信号出现时及时停止按键)等过程。而错误加工是在错误发生时出现的独特反馈信号。例如, 当抑制控制失败时(即某一试次发生错误), 大脑发出错误监控信号(如 ERN), 提醒个体进行适应性调整, 在后续试次中通过放慢反应速度、增强控制水平等避免错误。因此, 涉及到正误反应的任务(包含认知控制的多数范式)都需要错误加工的参与, 其与抑制控制等协同配合共同促进认知控制和目标达成(Gratton et al., 2018)。错误加工与抑制控制的重要联系是二者都需要注意的参与, 对目标刺激和无关刺激分配的注意资源权重影响认知控制结果(综述见：陈永强 等, 2022), 一般来说, 对目标刺激注意越多、无关刺激注意越少, 越有可能达成理想目标。不过, 二者也有重要区别, 比如表征它们的脑电信号的特征并不相同：错误加工信号是反应锁时(行为反应后出现), 而抑制控制信号通常是刺激锁时(冲突刺激呈现之后、行为反应之前出现)。例如, N2 是抑制控制的经典信号, 在冲突刺激出现约 200 ms 左右达到峰值, 表征对新异刺激或刺激−反应冲突的识别和加工(Ridderinkhof et al., 2004)。研究显示, ERN 和 N2 存在特异性, 比如无规律的背景音调虽然增强了箭头 Flanker 任务中的 ERN 信号, 但是并未显著影响 N2 波幅, 提示在不确定环境中错误加工相比于抑制控制或许有其独特作用机理(如 Speed et al., 2017)。

2.2　不确定状态对错误加工的影响及不一致结论

关于不确定状态对错误加工的影响, 一些观

点认为，不确定背景(如无规律的噪音)可能干扰个体的反应准备，使得犯错可能性增大(Grupe & Nitschke, 2013)。因此，为了克服不确定环境造成的干扰，个体可能提升错误敏感性和注意偏向(Herry et al., 2007)，进而增强错误监控强度。但是，也有一些研究持不同观点，认为不确定状态(如与不确定有关的急性应激)可能导致负性情绪体验，干扰前额叶的控制加工，进而损害错误加工过程(Hu et al., 2019; 胡娜 等, 2020)。研究发现总结如下：

采用经典箭头 Flanker 任务，研究者在任务过程中创设无规律 vs.有规律的背景音调，结果发现，这种伴随性的环境不确定状态增强了错误发生时的 ERN 反应，并且降低错误率，研究结论在成年和青少年样本得到了重复(Jackson et al., 2015; Speed et al., 2017)。但是，当启动不确定评价威胁时(如数学成绩是否低于预期存在不确定；对照组是确定性评价威胁)，个体在随后 Flanker 任务的 ERN 反应受到削弱(White et al., 2018)；通过应激诱导范式间接引起不确定状态时(如被试在严肃的“评委”面前即兴演讲；对照组是中性的非评价性任务)，应激个体在随后认知任务的 ERN 反应被削弱(Hu et al., 2019)，且错误意识水平显著降低(胡娜 等, 2020)。

此外，也有一些研究显示不确定状态对错误加工的作用并不确切。例如，采用内感受性范式时，不可预测(vs.可预测)的呼吸阻塞增强了吸气反应时任务的 ERN 反应，但是这种效应没有得到重复(只在不可预测条件先呈现时才有此效应)(Tan et al., 2019)；采用错误惩罚范式(即犯错可能受到电击惩罚)，Willems 等(2021)的研究并未发现不可预测(相较于可预测)的惩罚能够影响错误发生时的 ERN 反应。综上，不确定与错误加工的关系比较复杂，存在诸多矛盾结论。

2.3 以往研究结论不一致的原因分析和解决思路

通过对比和分析，以往研究矛盾结论的主要原因可能一是研究范式不同质，二是忽视人格差异性。

2.3.1 研究范式差异性——任务相关性的调节

不同研究范式诱发的不确定状态的性质存在差别，从而可能影响研究结论。具体而言，一些研究诱发的不确定状态与错误反应后果没有直接关联，是一种“背景式”的不确定(task-irrelevant uncertainty)。例如，部分研究在进行错误加工任务的同时伴随不确定的噪音背景(如 Jackson et al., 2015)，或者先诱发不确定威胁状态(如应激)，然后再进行独立的错误加工任务(如 Hu et al., 2019; White et al., 2018)，这些研究中错误反应后果与不确定背景没有必然的因果关联。然而，另一些研究诱发的不确定状态与错误后果绑定(task-relevant uncertainty)，比如按键错误将直接导致不确定/确定的电击惩罚(如 Willems et al., 2021)。显然两类研究诱发的不确定状态的性质不同，使得错误发生的后果也不相同，进而可能导致结果差异。

为了深入理解和解释这一现象，本研究提出一种假设：不确定状态对错误加工的影响可能受到任务相关性(task relevance)的调节(见图 1)。根据错误加工动机显著性理论视角(Hajcak et al., 2005; Hajcak & Foti, 2008)，错误本身令人厌恶甚

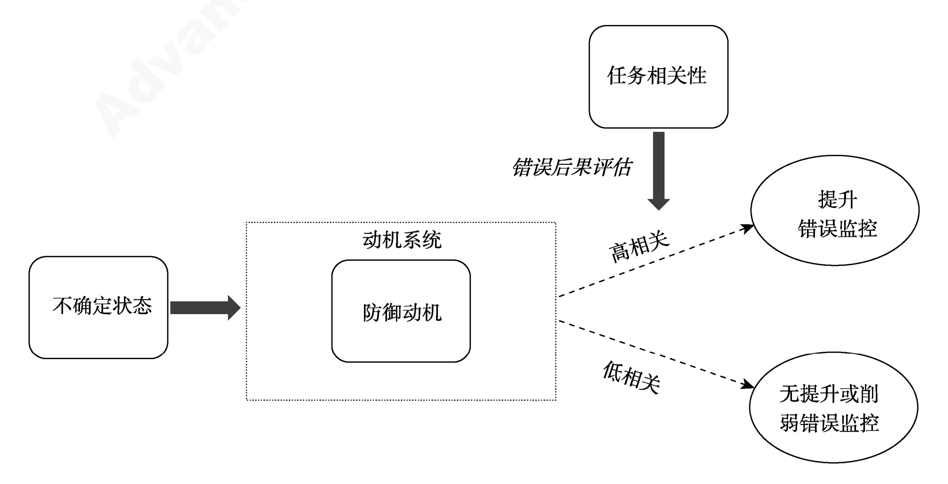


图 1 任务相关性调节不确定状态和错误加工关系的假设模型

至具有威胁性，它与防御动机有关，错误相关神经表征(如 ERN)反映动机性的错误探测过程，即 ERN 是犯错时防御动机系统激活的早期信号。研究发现，当被试的行为表现被外人评价(Hajcak et al., 2005)，或在错误反应给予惩罚时(Riesel et al., 2012), ERN 波幅显著增大。这些结果说明当错误后果具有更大的动机价值时，错误加工反应显著增强。因此，当不确定状态与任务本身具有内在一致性时(即高相关条件，task-relevant uncertainty)，错误是一种“内生”性质的威胁(integral errors)，犯错将导致更强的防御动机和错误监控；而当不确定状态与任务没有直接关联时(即低相关条件，task-irrelevant uncertainty)，错误被视为“偶然”现象(incidental errors)，此时个体防御动机较弱，其首要目标是拮抗负性体验，而不是减少错误，容易产生分心和注意分散，因此不能提升甚至损害错误监控。

例如，White 等人(2018)先让被试做一个数学测验，然后给予明确或模棱两可的成绩反馈以诱发不确定状态，接着再完成 Flanker 任务。显然，不确定的指向与错误加工任务无太大关联(即低相关不确定性)，这类不确定状态可能分散被试对当前错误的注意，干扰错误加工过程。而在 Willems 等(2021)的研究中，同样采用 Flanker 任务，在不确定条件下，错误按键将有 50%的概率受到高强度电击惩罚，该不确定状态与错误后果明确关联(即高相关不确定性)，能够增强错误敏感性，进而提升错误加工程度。遗憾的是，由于 Willems 等的研究设计存在一定瑕疵，比如不确定条件是 50%的概率受到高强度或低强度的电击(即错误就会受到电击，只是程度不同)，一定程度削弱了错误后果的不可预测性，对实验结果造成一定影响(如不确定 vs.确定条件差异未达到显著水平)。

课题组的前期研究为该假设提供了较为直接的证据支持。具体来说，基于意义保持模型(meaning maintenance model, Heine et al., 2006)，前期研究(Yang et al., 2019)尝试揭示自我不确定(即一种对于自我概念的模糊、矛盾感知状态，相当于自我概念清晰性的反面；参见：杨庆 等, 2017; Yang et al., 2022)能够增强个体的意义维持努力，即增强自尊追求动机和相关认知行为表现。采用 2 (自我不确定状态：不确定组 vs.控制组) × 2 (Stroop 任务与自尊的相关性：高相关 vs.低相关)被试间设计，通过创设情境操纵不确定状态(例如让被试思考在学业上感到不确定的方面)，随后进行 Stroop 任务，在此之前通过背景介绍使得被试确信 Stroop 任务能够有效反映学业自尊(高相关 vs.低相关；通过操作检查确保成功)。结果发现，相对于控制组，不确定组被试在自尊高相关(而不是低相关)任务中有更强的错误监控神经表征(如错误正波 Pe)和行为正确率，说明自我不确定状态增强了自尊追求动机和相关认知神经表征。尽管该研究(Yang et al., 2019)的理论基础和侧重点与本项目不同，但是能够较好说明任务相关性在不确定和错误加工关系中的调节作用，支持本项目假设。

此外，还有一些研究能够辅证任务相关性的作用。例如，在考察惩罚对错误加工的影响时，研究者发现，只有惩罚与否能够由自己的表现决定时(而不是由他人的表现决定)，惩罚才能够促进错误加工(如降低错误率)，而前者本质上是一种高相关条件(Bauer & MacNamara, 2022)。Meyer 和 Gawlowska (2017)在考察焦虑和惩罚对错误加工的联合影响时发现，焦虑虽然能够增强 ERN 反应，但是只发生在惩罚与自身表现高度相关的条件(而不是随机出现的低相关条件)，说明任务相关性起到调节作用。

2.3.2　人格差异性——不确定容忍度的调节

还有一些研究设置的不确定似乎也是“背景式”的(Jackson et al., 2015; Speed et al., 2017)，为何仍可以增强错误加工反应？原因一或许是错误加工任务过程中持续伴随不确定的噪音，可能对任务本身形成较强干扰，进而提升错误厌恶度、敏感性，增强错误监控，即原本“背景式”的不确定转变为高相关不确定。原因二可能是研究被试自身对不确定环境的敏感性较高，促进了不确定与错误结果之间的绑定(如厌恶和避免此情境中错误的发生)。

我们猜测，由于个体间对于不确定情境的敏感程度存在差异，可能调节不确定环境中的错误加工。不确定容忍度(也称无法忍受不确定性，intolerance of uncertainty; IU)是一种面对不确定(模糊)情境时在认知、情绪和行为倾向上表现出的稳定个体差异(Carleton, 2016)。不确定容忍度较低的个体对于不确定性存在认知偏差，容易将模糊情境视为威胁，感到紧张和压力，对于不确定环

境具有更高的注意偏向和防御反应(Tanovic et al., 2018; Yang et al., 2021)。由于这些特征, IU 与多类焦虑障碍、强迫症、抑郁症等的发生存在密切联系, 被称为跨诊断风险因子(transdiagnostic factor) (综述见 Carleton, 2016)。IU 存在不同分类和测量方式, 比如可以根据量表总分将其划分为高分者 vs.低分者(Buhr & Dugas, 2002); 还有学者(Carleton et al., 2007)将 IU 细分为预期型(prospective IU)和抑制型(inhibitory IU)两类, 前者是对确定性的渴求、主动应对不确定的倾向; 后者是被动回避以及在不确定面前不知所措、“冻结”(freeze)的倾向。

研究表明, 在模糊奖赏情境, 不确定容忍度较低(即 IU 较高)的个体表现出前脑岛的过度激活(Gorka et al., 2016), 且主要是预期型 IU(而非抑制型 IU)发挥作用。在模糊威胁(电击)情境, IU 总分较高的个体表现出较弱的惊跳反射(Nelson & Shankman, 2011), 不过当考虑不同类型 IU 作用时, 抑制型 IU 能够稳定地预测降低的惊跳反射(Nelson et al., 2016; Nelson & Shankman, 2011), 而预期型 IU 对惊跳反射的预测作用不稳定(例如有时发现正相关, 见 Nelson et al., 2016; 有时不相关, 见 Nelson & Shankman, 2011)。还有研究发现抑制型 IU (而不是预期型 IU)较高的个体在模糊威胁情境中表现出注意投入(N1、P300)的降低, 原因可能是抑制型个体倾向于采取回避方式、降低对不确定的关注(Correa et al., 2022)。以上研究说明 IU 的确影响个体在不确定情境中的注意加工, 且不同类型 IU 在奖赏/威胁情境中的敏感性似乎不同: 预期型 IU 是一种主动应对和处理模糊信息的倾向, 对应于趋近动机系统, 可能对于模糊奖赏信息较为敏感; 而抑制型 IU 是被动逃避模糊情境的倾向, 对应于趋避动机系统, 对于模糊惩罚信息更为敏感。

同时, IU 与错误加工也有关联, 由于错误发生与否带有偶然性, 不确定忍受水平不同的个体对于错误后果的担忧程度可能存在差异, 进而影响对待错误的动机(Jackson et al., 2016; Ruchensky et al., 2020)。例如, Jackson 等人的研究发现预期型 IU 与主动减少错误的动机有关, 表现出增强的 ERN; 而抑制型 IU 与被动逃避错误的动机有关, 表现出降低的 ERN。不过, 该结论未在另一项研究中得到完全重复(Sandre & Weinberg, 2019)。还有相关研究表明 IU 能够调节精神病理症状与错误加工的关系: Ruchensky 等(2020)发现抑郁症状与较大的 ERN 波幅有关, 但是该相关关系只出现在低 IU 的个体。以上研究显示 IU 与错误加工有潜在关系, 由于研究相对较少, 结论尚不确切, 还需深入探索。

总之, 目前还没有研究同时系统探讨 IU、不确定状态以及错误加工三者的关系。本项目拟聚焦于不确定与错误后果绑定的情形(task-relevant uncertainty), 采用统一的不确定诱导范式, 尝试揭示人格的调节作用。

3 研究构想

通过两个研究系统考察不确定状态中的错误加工规律。研究目标主要有两点: 一是通过结合多种不确定情形系统揭示不确定状态下的错误加工认知特点和神经表征, 二是阐明特质不确定容忍度的调节作用。研究 1 主要揭示认知特点(如错误意识、错误后调整), 研究 2 重点关注背后的神经表征(如 ERN/Pe、时间加工进程、神经振荡机制), 以更好地解释行为差异的原因。

现实生活不确定状态有多种, 前人研究主要通过情景启动的方式诱发不确定(例如设置无规律的噪音背景; Jackson et al., 2015), 但是它与错误本身关联不大, 启动效果不稳定。本研究主要关注与错误反应结果紧密相关的不确定状态(task-relevant uncertainty), 因为它更具社会意义, 且诱发效果稳定。其中, 奖赏和惩罚信息的不确定最具代表性, 在经典决策领域有丰硕研究成果(参见 Kahneman et al., 2013; Li, 2005)。因此, 拟通过设置不同概率的奖赏或惩罚线索诱发不确定状态, 这种范式更加成熟、统一, 研究结论方便比较。

值得注意的是, 由于个体在奖赏 vs.惩罚的心理感受、敏感性、风险寻求和加工机制等有所不同(即存在收益和损失的“框架效应”, 参见卡尼曼“亚洲疾病问题”及其相关研究, Gao et al., 2017; Li & Xie, 2006; Tversky & Kahneman, 1981; 以及奖惩神经机制对比研究, Preuschoff et al., 2006; Yin et al., 2017; Zhang et al., 2021), 本研究拟先分开考察奖赏不确定(如实验 1)、惩罚不确定(如实验 2)情形, 再合并进行综合比较(如实验 3)。通过设置多种情形, 有利于综合考察不确定状态对错误加工的影响特点及加工机制, 研究结论更具生态效度和系统性。

前面提到，不确定容忍度(IU)也有多种分类方式。常见的第一种方式是以单维视角将 IU 划分为高分组 vs.低分组(Buhr & Dugas, 2002)。第二种方式是以双维视角将 IU 分为两类：预期型 vs.抑制型(Carleton et al., 2007)，前者似乎对于奖赏信息较为敏感，而后者对于惩罚信息更为敏感。例如，研究发现在模糊奖赏情境，预期型 IU 预测更强的奖赏正波(RewP)，抑制型 IU 却预测更弱的奖赏正波(Nelson et al., 2016)；而在模糊惩罚情境，相对于预期型 IU，抑制型 IU 对于惊跳反射的预测作用更为灵敏(Nelson & Shankman, 2011)。因此，不同类型的 IU (预期型 vs.抑制型)对于奖赏 vs.惩罚不确定信息的敏感性可能不同。

为了全面深入考察特质 IU 在多种不确定情形对错误加工的调节，本项目拟对 IU 采取不同分类方式。参照前人研究(Gorka et al., 2016; Nelson et al., 2016)，第一种分类方式(如按单维总分划分)运用于单一不确定情形(奖赏或惩罚)；第二种分类方式(如按双维类型划分)适合奖赏和惩罚不确定都存在的情形，这样能够比较它们对于错误加工的差异化作用。

本项目整体研究方案如图 2 所示。简言之，错误加工采用基于 go/no-go 范式的错误意识任务(参见 Hester et al., 2005; 胡娜 等, 2020; 王丽君 等, 2020)，不确定诱发是基于 NPU 不确定线索范式(参见 Willems et al., 2021)，即在每一个组块给予奖赏/惩罚线索提示(如 50%的概率获得奖励)。NPU 是研究错误加工、奖赏加工、情绪加工等领域的常用范式，其原理是在每个 block 或 trial 开始前呈现线索提示(neutral/predictable/unpredictable)以操作不确定性，然后被试进行选择或反应，随后根据研究目的给予(如 Willems et al., 2021)或不给予反馈(如 Han et al., 2022)，由于本研究还考察错误意识问题(即是否意识到反应错误)，所以不适合给予反馈。需要说明的是，本研究中错误加工任务有明确的正误反应之分，但是反应结果是否导致奖励或惩罚在不确定条件下是未知的，即相对于确定条件，不确定条件下被试并不明确按键结果是否带来奖惩。因此，这种情境下特质不确定容忍度(IU)可能发挥调节效应，如前文所述，不同水平或不同类型 IU 的个体对于不确定情境和错误的敏感程度不同，从而影响其在不确定状态中的动机和注意投入，进而调节错误加工过程。

3.1 研究 1：不确定状态中的错误加工以及 IU 的调节：认知特点

包含 3 个行为实验，重点考察认知特点，设置 3 种不确定情形：奖赏不确定(实验 1)、惩罚不确定(实验 2)以及奖惩不确定(实验 3)。实验 1 和实验 2 考察总体 IU 的调节作用；而实验 3 进一步将 IU 划分为两种类型，考察调节作用。错误加工通过多个指标进行表征：错误意识——即按键反应后是否意识到发生了错误，可以区分意识到 vs.

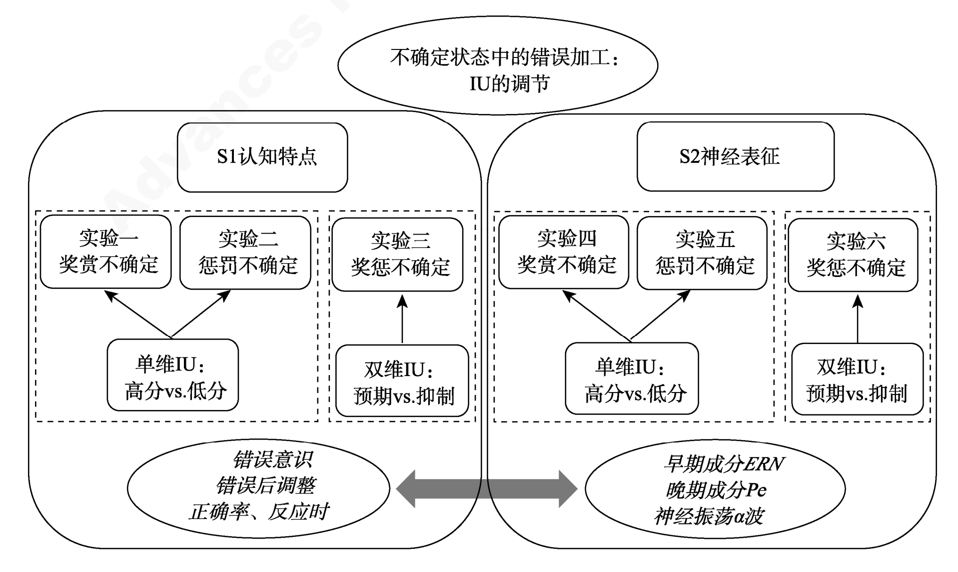


图 2　项目研究框架和技术路线图

未意识到的错误，表征错误监控的意识水平；以及错误后调整——包括错误反应后的正确率、反应时等，可以表征错误调整强度、效果。

实验 1 (奖赏不确定情境)：采用 2 (IU：高 vs.低) × 3 (奖赏程度：基线 vs.确定 vs.不确定)混合设计，前者为被试间因素，后者为被试内因素。基于 go/no-go 范式的错误意识任务共包含三种奖赏条件：基线(即无奖赏 N)、确定奖赏 P 和不确定奖赏 U，采取 blockwise 设计。每种条件开始前给予线索提示，说明该条件中正确试次获得奖赏的程度(错误试次均没有惩罚)。在基线条件，正确试次没有奖励；在确定条件，正确试次获得 10 个代金币奖励；在不确定条件，正确试次随机获得 0 或 20 个代金币奖励，概率同为 50%。这样设置的原因是保证确定 vs.不确定条件每个试次的预期价值(expected value)是相同的(都是 10)，唯一区别在于不确定状态本身，以控制单纯奖赏动机的可能解释(参见：梁竹苑 等, 2012; Lin et al., 2021; Mason et al., 2017)。被试依次完成三种条件，顺序进行平衡。实验结束后按照规则将代金币兑换为被试费。

错误意识任务细节如下(参见：胡娜 等, 2020; 王丽君 等, 2020)：被试需要对不同颜色背景的汉字做反应。go 试次规则：当字义和背景色一致时，被试迅速按键；no-go 试次规则：(1)当二者不一致时，被试不能按键；(2)当前试次的字义与前一试次一样时，也不能按键。这种竞争性的 no-go 反应规则有助于诱发未意识到的错误反应(王丽君 等, 2020)。按键分配在被试间进行平衡。在每个试次中，首先呈现 1000 ms 注视点，然后呈现 800 ms 刺激词，被试需在规定时间内反应，随后刺激消失，接着呈现 1000 ms 空屏，而后出现 1000 ms 的#符号提示进行错误意识标记，被试在规定时间内报告刚才是否发生错误。最后呈现 500 ms 空屏的试次间隔。

实验 2(惩罚不确定情境)：采用 2 (IU：高 vs.低) × 3 (惩罚程度：基线 vs.确定 vs.不确定)混合设计。错误意识任务包含三种惩罚条件：基线(即无惩罚)、确定惩罚和不确定惩罚。每种条件开始前给予线索提示，说明该条件中错误试次被惩罚的程度(正确试次均无奖励)。在基线条件，错误试次没有金钱损失；在确定条件，错误试次被扣除 10 个代金币；在不确定条件，错误试次被随机扣除 0 或 20 个代金币，概率同为 50%。其余设置和流程同实验 1。

实验 3(奖惩不确定情境)：采用 2 (IU 类型：预期型 vs.抑制型) × 2 (奖惩：奖赏 vs.惩罚) × 2 (不确定性：确定 vs.不确定)混合设计，IU 类型为被试间、其余为被试内因素。错误意识任务包含以下条件：确定奖赏、不确定奖赏、确定惩罚、不确定惩罚。每种条件开始前给予线索提示，说明该条件中试次被奖惩的程度。在确定奖赏条件，正确试次获得 10 个代金币奖励，错误试次无损失；在不确定奖赏条件，正确试次 50%的概率获得 20 个代金币奖励，错误试次无损失；在确定惩罚条件，错误试次被扣除 10 个代金币，正确试次无奖励；在不确定惩罚条件，错误试次 50%的概率被扣除 20 个代金币，正确试次无奖励。实验前给被试一定数额的起始代金币，实验结束后按照规则将奖惩之后的代金币兑换为被试费。

3.2 研究 2：不确定状态中的错误加工以及 IU 的调节：神经表征

研究 2 包括 3 个 ERP 实验，重点考察认知特点背后的神经基础，同样设置 3 种不确定情形：奖赏不确定(实验 4)、惩罚不确定(实验 5)和奖惩不确定(实验 6)。类似地，实验 4 和实验 5 考察总体 IU 的调节；实验 6 进一步将 IU 划分为两种类型，考察调节作用。

错误监控是动态的，包含不同神经心理成分以及时间加工阶段(Dehaene, 2018)。错误相关负波(ERN)是早期成分，一般不受错误意识影响，而错误正波(Pe)是晚期成分，通常只在意识到错误时出现(Dehaene, 2018)。二者常在不同的实验范式中观察到分离(综述见：韩明秀, 贾世伟, 2016)。我们的研究(Yang et al., 2019)也发现自我不确定的启动会诱发更大的 Pe 成分，但没有观察到 ERN 的显著变化，说明不确定性的效应可能跟错误意识有关。此外，神经振荡研究显示，枕顶区 alpha 波(8~14 Hz)的功能意义体现了试次间的注意警觉、冲突适应和错误后调整(Sadaghiani & Kleinschmidt, 2016)。例如，王丽君等人(2020)发现意识到错误相较于未意识到错误诱发更强的 alpha 波能量；Hwang 等人(2016)发现 alpha 波能量变化预测行为正确率。因此，本项目还将 alpha 波能量变化作为解释错误意识在错误后调整中的作用指标。

实验 4 (奖赏不确定情境): 采用 2 (IU: 高 vs. 低) × 3 (奖赏程度: 基线 vs.确定 vs.不确定)混合设计, 组块和试次设计基本同实验 1, 同时记录脑电数据。数据处理及指标计算: 一方面, 通过观察各条件下的总平均波形图和地形图, 并根据以往相关研究, 在相应时窗和电极点提取各个条件中 ERN、Pe 等成分的波幅、潜伏期。另一方面, 通过时频域数据转换获取 alpha 波能量信息, 根据前人研究(王丽君 等, 2020; Sadaghiani & Kleinschmidt, 2016), 将枕顶区以及相应时间窗定义为空间和时频感兴趣区。通过神经—行为指标的联合分析全面地揭示不确定状态中的错误意识、错误后调整情况。

实验 5 (惩罚不确定情境): 采用 2 (IU: 高 vs. 低) × 3 (惩罚程度: 基线 vs.确定 vs.不确定)混合设计, 组块和试次设计基本同实验 2, 同时记录脑电数据。数据处理和指标计算同实验 4。

实验 6 (奖惩不确定情境): 采用 2 (IU 类型: 预期型 vs.抑制型) × 2 (奖惩: 奖赏 vs.惩罚) × 2 (不确定性: 确定 vs.不确定)混合设计, 组块和试次设计基本同实验 3, 同时记录脑电数据。数据处理和指标计算同实验 4。

4　理论建构

不确定是生活常态, 反复波动的新冠肺炎疫情切实说明这一点。然而, 不确定都是坏的么? 不确定性如何影响人类的高级认知功能是极具现实意义和挑战性的科学问题。同时, 从错误中吸取经验从而避免错误的再次发生, 影响着个体的生存、发展以及目标实现。由于不确定和错误有紧密的内在关联性, 探讨不确定状况下的错误监控和调整过程具有重要理论和应用价值。鉴于前人关于不确定与错误加工关系的研究存在诸多矛盾结果, 本项目通过深入分析与比较, 提出不确定人格(如不确定容忍度)可能是潜在调节机制。我们构想, 不确定容忍水平不同的个体对于不确定环境的感知、理解和体验存在差异, 进而影响对错误的注意和敏感性, 从而调节不确定状态和错误加工的关系。结合前期研究基础(如: 杨庆 等, 2017; Yang et al., 2019, 2021), 本研究尝试建构理论机制模型(见图 3), 对现有研究矛盾点进行解释和拓展。

首先, 尽管已有研究探讨了多种不确定状态对错误加工的影响, 但是对于相互矛盾的结果未有理论解析。本研究认为, 不确定状态对于错误加工的影响取决于动机系统的参与。一方面, 不确定状态能够诱发防御动机反应, 比如自我不确定(指对内在重要心理品质的冲突和怀疑)先触发近端防御系统, 导致趋避动机反应(如紧张、焦虑), 随后个体启动远端防御系统, 通过适应性的趋近动机反应(如文化世界观防御、意义补偿)等缓解不确定状态(综述见: 杨庆 等, 2017)。另一方面, 错误加工动机显著性理论视角(如 Hajcak et al., 2005) 提出并证明错误具有动机性质, 当错误被赋予更大价值时(如错误反应给予金钱/电击惩罚; Riesel et al., 2012), 个体对于错误的敏感性、监控程度等会提升。因此, 不确定状态对于错误加工的影响取决于其增强还是削弱动机水平: 当错误加工任务与不确定指向存在高度关联时(即错误后果与不确定指向绑定情形), 则不确定状态可能通过增

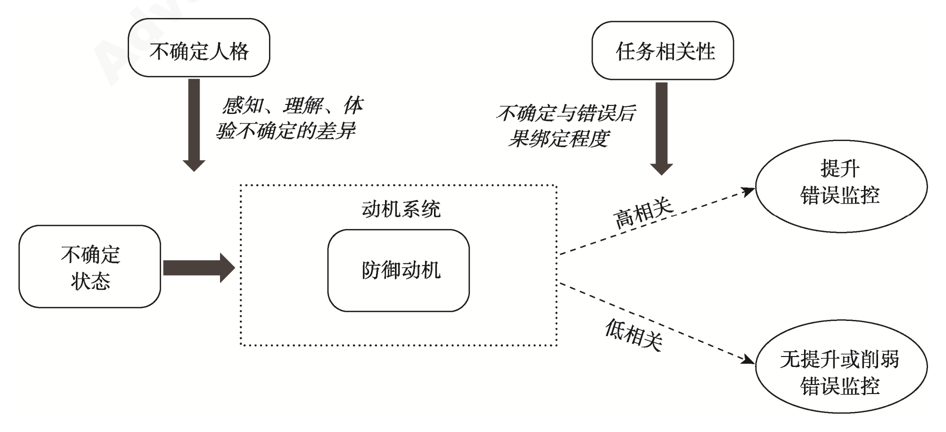


图 3　基于人格差异视角的不确定—错误加工整合机制模型

强动机水平提升错误监控程度；反之，当错误加工任务与不确定指向无明确关联时，则不确定状态无法增强、甚至反而削弱动机水平，从而无助于提升错误加工。该理论模型具有一定的延展性和概括性，有助于解释相关领域(如精神病理与错误加工)的结果。例如，新近的一项研究(Härpfer et al., 2022)探讨状态性担忧(state worry)对于错误加工的影响，采用前后测随机对照实验，研究者并未发现所诱发的担忧(如忧虑的生活事件)能够影响随后 Flanker 任务的 ERN 波幅和行为错误率。结合该模型解释，或许是担忧的对象与错误后果没有明确关联(即低相关情形)，被试没有潜在的动机增强错误监控。总之，本研究模型提示不确定并非都是坏的，任务相关性发挥潜在调节作用，当其与个体目标相一致时，有助于将不确定威胁化为挑战，促进积极结果。

其次，当采用上述高相关任务时(即绑定情形; task-relevant uncertainty)，不确定有关的人格差异可能是另一重要调节机制，因其也可能影响动机水平。个体对于不确定的感知和应对方式存在差异，一些个体对于不确定环境敏感度高，维护确定性的防御动机强，而另一些个体对于不确定的耐受程度较高，不容易产生防御动机(Carleton, 2016)。不确定容忍度(IU)能够调节个体在相同不确定情境中的防御动机状态，进而影响错误加工卷入程度。关于实验 1 和实验 2，预期总体不确定容忍程度较低的个体，在不确定情境中的防御动机可能较强，或许能够增强错误监控水平。关于实验 3，将 IU 进一步区分为预期型和抑制型，推测预期型 IU 个体对于不确定奖赏情境较为敏感、趋近奖赏动机更强，可能增强该情境中的错误监控；而抑制型 IU 个体对于不确定惩罚情境更为敏感、回避惩罚的动机更强，使得该情境中的错误监控程度可能更高。通过引入不确定容忍度，有利于进一步解释前人研究的矛盾结果，从人格差异角度初步构建不确定影响错误加工的调节模型，对于启发更多的调节机制研究具有重要理论价值。

另外，本项目在研究范式上进行融合创新，以期深入揭示错误加工全阶段、全过程的认知特点和神经表征。基于 go/no-go 范式的错误意识任务与不确定奖惩诱导范式融合，能够区分意识到 vs.未意识到的错误，进而能够探讨不同类型的错误监控对于错误后调整的影响；并且，借助 ERP 指标，能够全面地考察上述认知特点背后的神经表征和时间加工进程(如早晚期成分、神经振荡)。

不过，本项目设计也存在一些局限性，尚无法完全揭示动机影响错误加工的具体机制。本文的核心观点是不确定奖惩通过影响动机系统进而作用于错误加工，但是动机→错误加工可能存在多种作用路径。一方面，由于注意和动机、错误加工都存在密切联系，动机可能通过增强选择性注意影响错误加工。例如，前扣带回既是错误监控的核心区域，同时也被认为是动机与注意交互的中心(hub) (Shenhav et al., 2013)，因此，注意可能是动机影响错误加工的核心机制之一。另一方面，错误加工也有赖于记忆学习。工作记忆是一种在多种干扰情境维持任务目标的能力，工作记忆较好的个体具有更精细的注意控制网络，易于监测任务干扰物，并及时刷新任务目标(Miller et al., 2012)。研究发现，当任务目标受到干扰时，工作记忆能力越强的个体其错误监控表现越好(即 ERN 波幅越大; Miller et al., 2012)。遗憾的是，动机如何通过影响工作记忆进而作用于错误加工目前还不清楚。最近，国内陈安涛团队在解决冲突适应的争议问题时，提出了“注意引导的绑定学习”理论假设(如：陈永强 等, 2022)，认为冲突适应不仅需要根据任务目标合理分配注意资源，还要经由绑定学习增强“刺激−反应”的记忆表征，二者相结合来促进冲突适应行为。因此，注意和记忆如何交互影响错误加工过程，以及动机在其中怎样发挥作用，或许是未来的重要研究方向。

总而言之，在前期研究基础上，尝试通过进一步的研究来构建和检验基于人格差异的不确定—错误加工整合机制模型，从理论上解释前人研究的矛盾结论。未来需要将人格与认知因素结合进行综合探讨，以期全方位揭示人们在不确定状态中的错误加工特点和机制，进而在实践上有效指导个体改善对不确定的认识，将威胁化为挑战(将坏事变成好事)，促进个体社会适应和目标达成。

参考文献

陈永强, 高伟, 张孟可, 尹首航, 陈安涛. (2022). 注意引导绑定: 冲突适应研究整合的路径. *科学通报*, *67*(8), 728–741.

韩明秀, 贾世伟. (2016). 错误加工意识水平与错误相关脑电成分. *心理科学进展*, *24*(11), 1758–1766.

胡娜, 陈安涛, 王宴庆, 李晴, 许珍珍, 龙泉杉. (2020).

急性应激损伤错误监控与错误后调整. *心理学报*, *52*(2), 162–172.

梁竹苑, 徐丽娟, 饶俪琳, 蒋田仔, 李纾. (2012). "20%的概率获得蛋糕"="获得蛋糕的20%"? 检验风险决策的期望法则假设. *科学通报*, *57*(35), 3421–3433.

刘春雷, 张庆林. (2009). 错误加工的神经机制. *心理科学进展*, *17*(2), 341–348.

王丽君, 索涛, 赵国祥. (2020). 未意识到错误影响错误后调整的电生理证据. *心理学报*, *52*(10), 1189–1198.

杨庆, 毕重增, 李林, 黄希庭. (2017). 自我不确定感: 内涵, 结构和理论. *心理科学进展*, *25*(6), 1012–1024.

Bauer, E. A., & MacNamara, A. (2022). Group differences in agency modulate error monitoring. *Psychophysiology*, *59*(7), e14011.

Buhr, K., & Dugas, M. J. (2002). The intolerance of uncertainty scale: Psychometric properties of the English version. *Behaviour Research and Therapy*, *40*(8), 931–945.

Carleton, R. N. (2016). Into the unknown: A review and synthesis of contemporary models involving uncertainty. *Journal of Anxiety Disorders*, *39*, 30–43.

Carleton, R. N., Norton, M. P. J., & Asmundson, G. J. (2007). Fearing the unknown: A short version of the Intolerance of Uncertainty Scale. *Journal of Anxiety Disorders*, *21*(1), 105–117.

Correa, K. A., Li, L. Y., Nelson, B. D., & Shankman, S. A. (2022). Event-related potentials to acoustic startle probes during unpredictable threat are associated with individual differences in intolerance of uncertainty. *International Journal of Psychophysiology*, *174*, 66–75.

Dehaene, S. (2018). The error-related negativity, self-monitoring, and consciousness. *Perspectives on Psychological Science*, *13*(2), 161–165.

Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *78*(6), 447–455.

Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S., & Hohnsbein, J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: A tutorial. *Biological Psychology, 51,* 87–107.

Fu, Z., Wu, D. A. J., Ross, I., Chung, J. M., Mamelak, A. N., Adolphs, R., & Rutishauser, U. (2019). Single-neuron correlates of error monitoring and post-error adjustments in human medial frontal cortex. *Neuron*, *101*(1), 165–177.

Gao, X., Liu, J., Gong, P., Wang, J., Fang, W., Yan, H., ... Zhou, X. (2017). Identifying new susceptibility genes on dopaminergic and serotonergic pathways for the framing effect in decision-making. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *12*(9), 1534–1544.

Gorka, S. M., Nelson, B. D., Phan, K. L., & Shankman, S. A. (2016). Intolerance of uncertainty and insula activation during uncertain reward. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *16*(5), 929–939.

Gratton, G., Cooper, P., Fabiani, M., Carter, C. S., & Karayanidis, F. (2018). Dynamics of cognitive control: Theoretical bases, paradigms, and a view for the future. *Psychophysiology*, *55*(3), e13016.

Grupe, D. W., & Nitschke, J. B. (2013). Uncertainty and anticipation in anxiety: An integrated neurobiological and psychological perspective. *Nature Reviews Neuroscience*, *14*(7), 488–501.

Hajcak, G. (2012). What we've learned from mistakes: Insights from error-related brain activity. *Current Directions in Psychological Science, 21*(2), 101–106.

Hajcak, G., & Foti, D. (2008). Errors are aversive: Defensive motivation and the error-related negativity. *Psychological Science*, *19*(2), 103–108.

Hajcak, G., Moser, J. S., Yeung, N., & Simons, R. F. (2005). On the ERN and the significance of errors. *Psychophysiology*, *42*(2), 151–160.

Han, S., Hu, J., Gao, J., Fan, J., Xu, X., Xu, P., & Luo, Y. J. (2022). Neural dynamics and coupling underlying uncertain anticipatory conflicts in anxious individuals. *Cerebral Cortex*, *32*(19), 4284-4292.

Härpfer, K., Carsten, H. P., Löwisch, K., Westermann, N., & Riesel, A. (2022). Disentangling the effects of trait and state worry on error-related brain activity: Results from a randomized controlled trial using worry manipulations. *Psychophysiology*, *59*(4), e14055.

Heine, S. J., Proulx, T., & Vohs, K. D. (2006). The meaning maintenance model: On the coherence of social motivations. *Personality and Social Psychology Review*, *10*(2), 88–110.

Herry, C., Bach, D. R., Esposito, F., Di Salle, F., Perrig, W. J., Scheffler, K., ... Seifritz, E. (2007). Processing of temporal unpredictability in human and animal amygdala. *Journal of Neuroscience, 27*(22), 5958–5966.

Hester, R., Foxe, J. J., Molholm, S., Shpaner, M., & Garavan, H. (2005). Neural mechanisms involved in error processing: A comparison of errors made with and without awareness. *Neuroimage*, *27*(3), 602–608.

Hu, N., Hu, X., Xu, Z., Li, Q., Long, Q., Gu, Y., & Chen, A. (2019). Temporal dynamic modulation of acute stress on error processing in healthy males. *Psychophysiology*, *56*(9), e13398.

Hwang, K., Ghuman, A. S., Manoach, D. S., Jones, S. R., & Luna, B. (2016). Frontal preparatory neural oscillations associated with cognitive control: A developmental study comparing young adults and adolescents. *Neuroimage*, *136*,

139–148.

Imburgio, M. J., Banica, I., Hill, K. E., Weinberg, A., Foti, D., & MacNamara, A. (2020). Establishing norms for error-related brain activity during the arrow Flanker task among young adults. *Neuroimage*, *213*, 116694.

Jackson, F., Nelson, B. D., & Hajcak, G. (2016). The uncertainty of errors: Intolerance of uncertainty is associated with error-related brain activity. *Biological Psychology*, *113*, 52–58.

Jackson, F., Nelson, B. D., & Proudfit, G. H. (2015). In an uncertain world, errors are more aversive: Evidence from the error-related negativity. *Emotion, 15*(1), 12–16.

Kahneman, D., Slovic, P., & Tversky, A. (Eds.). (2013). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. New York: Cambridge University Press. (Original work published 1982)

[卡尼曼, D., 斯洛维奇, P., 特沃斯基, A. (2013). *不确定状况下的判断: 启发式和偏差* (方文, 吴新利, 张擘译). 北京: 中国人民大学出版社.]

Kerns, J. G., Cohen, J. D., MacDonald, A. W., Cho, R. Y., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2004). Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, *303*(5660), 1023–1026.

Li, S. (2005). Choice reversals across certainty, uncertainty and risk: The Equate-to-Differentiate interpretation. *心理学报*, *37*(4), 427–433.

Li, S., & Xie, X. (2006). A new look at the "Asian disease" problem: A choice between the best possible outcomes or between the worst possible outcomes? *Thinking & Reasoning*, *12*(2), 129–143.

Lin, Y., Gu, R., Luan, S., Hu, L., Qin, S., & Luo, Y. J. (2021). The hierarchical sensitivity to social misalignment during decision-making under uncertainty. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *16*(6), 565–575.

Mason, A., Farrell, S., Howard-Jones, P., & Ludwig, C. J. (2017). The role of reward and reward uncertainty in episodic memory. *Journal of Memory and Language*, *96*, 62–77.

Meyer, A., & Gawlowska, M. (2017). Evidence for specificity of the impact of punishment on error-related brain activity in high versus low trait anxious individuals. *International Journal of Psychophysiology*, *120*, 157–163.

Miller, A. E., Watson, J. M., & Strayer, D. L. (2012). Individual differences in working memory capacity predict action monitoring and the error-related negativity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *38*(3), 757–763.

Nelson, B. D., Liu, H., Sarapas, C., & Shankman, S. A. (2016). Intolerance of uncertainty mediates the relationship between panic and the startle reflex in anticipation of unpredictable threat. *Journal of Experimental Psychopathology*, *7*(2), 172–189.

Nelson, B. D., & Shankman, S. A. (2011). Does intolerance of uncertainty predict anticipatory startle responses to uncertain threat? *International Journal of Psychophysiology*, *81*(2), 107–115.

Preuschoff, K., Bossaerts, P., & Quartz, S. R. (2006). Neural differentiation of expected reward and risk in human subcortical structures. *Neuron*, *51*(3), 381–390.

Ridderinkhof, K. R., Ullsperger, M., Crone, E. A., & Nieuwenhuis, S. (2004). The role of the medial frontal cortex in cognitive control. *Science*, *306*(5695), 443–447.

Riesel, A., Weinberg, A., Endrass, T., Kathmann, N., & Hajcak, G. (2012). Punishment has a lasting impact on error-related brain activity. *Psychophysiology*, *49*(2), 239–247.

Ruchensky, J. R., Bauer, E. A., & MacNamara, A. (2020). Intolerance of uncertainty, depression and the error-related negativity. *International Journal of Psychophysiology*, *153*, 45–52.

Sadaghiani, S., & Kleinschmidt, A. (2016). Brain networks and α-oscillations: Structural and functional foundations of cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, *20*(11), 805–817.

Sandre, A., & Weinberg, A. (2019). Neither wrong nor right: Theta and delta power increase during performance monitoring under conditions of uncertainty. *International Journal of Psychophysiology*, *146*, 225–239.

Shenhav, A., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2013). The expected value of control: An integrative theory of anterior cingulate cortex function. *Neuron*, *79*(2), 217–240.

Speed, B. C., Jackson, F., Nelson, B. D., Infantolino, Z. P., & Hajcak, G. (2017). Unpredictability increases the error-related negativity in children and adolescents. *Brain and Cognition*, *119*, 25–31.

Tan, Y., Van den Bergh, O., Qiu, J., & Von Leupoldt, A. (2019). The impact of unpredictability on dyspnea perception, anxiety and interoceptive error processing. *Frontiers in Physiology*, *10*, 535.

Tanovic, E., Gee, D. G., & Joormann, J. (2018). Intolerance of uncertainty: Neural and psychophysiological correlates of the perception of uncertainty as threatening. *Clinical Psychology Review*, *60*, 87–99.

Tversky, A., & Kahneman, D. (1981). The framing of decisions and the psychology of choice. *Science*, *211*(4481), 453–458.

Ullsperger, M., Danielmeier, C., & Jocham, G. (2014). Neurophysiology of performance monitoring and adaptive behavior. *Physiological Reviews*, *94*(1), 35–79.

White, E. J., Grant, D. M., Taylor, D. L., Frosio, K. E., Mills,

A. C., & Judah, M. R. (2018). Examination of evaluative threat in worry: Insights from the Error-Related Negativity (ERN). *Psychiatry Research: Neuroimaging*, *282*, 40–46.

Willems, A. L., Jelinčić, V., Vlaeyen, J. W., von Leupoldt, A., & Torta, D. M. (2021). Is it a painful error? The effect of unpredictability and intensity of punishment on the error-related negativity, and somatosensory evoked potentials. *Biological Psychology*, *165*, 108177.

Yang, Q., Van den Bos, K., & Li, Y. (2021). Intolerance of uncertainty, future time perspective, and self-control. *Personality and Individual Differences, 177, 110810*.

Yang, Q., Van den Bos, K., Zhang, X., Adams, S., & Ybarra, O. (2022). Identity lost and found: Self-concept clarity in social network site contexts. *Self and Identity*, *21*(4), 406–429.

Yang, Q., Ybarra, O., Van den Bos, K., Zhao, Y., Guan, L., Cao, Y., … Huang, X. (2019). Neurophysiological and behavioral evidence that self-uncertainty salience increases self-esteem striving. *Biological Psychology*, *143*, 62–73.

Yin, Y., Yu, H., Su, Z., Zhang, Y., & Zhou, X. (2017). Lateral prefrontal/orbitofrontal cortex has different roles in norm compliance in gain and loss domains: A transcranial direct current stimulation study. *European Journal of Neuroscience*, *46*(5), 2088–2095.

Zhang, S., Verguts, T., Zhang, C., Feng, P., Chen, Q., & Feng, T. (2021). Outcome value and task aversiveness impact task procrastination through separate neural pathways. *Cerebral Cortex*, *31*(8), 3846–3855.

Is uncertainty bad? Mixed findings and explanatory model of error processing under uncertainty

YANG Qing, LI Yaqin

(*School of Psychology*, *Qufu Normal University*, *Qufu* 273165, *China*)

Abstract: Errors are inevitable in human decision-making and goal-directed behavior. However, errors can bring adverse consequences and are sometimes life-threatening (such as mistakes in high-risk operations). Effectively monitoring errors and optimizing behavior are thus critical to individual survival and development. The occurrence of errors is affected by people’s internal psychological state, when they make decisions and take actions in an uncertain state. Whether the uncertainty enhances error monitoring or not is an important scientific question. Currently, there are contradictory findings. Based on previous work and theoretical analysis, the current project aims to explore the moderating role of intolerance of uncertainty in error monitoring from the perspective of personality differences. Specifically, we explore whether an individual’s tolerance to ambiguous situations and the sensitivity to errors would moderate error processing in uncertain situations. Study 1 is designed to investigate the cognitive characteristics of error monitoring and post-error adjustment in a variety of uncertain situations (e.g., reward/punishment), examining the moderating effect of intolerance of uncertainty with a series of behavioral experiments. Study 2 would explore the underlying electrophysiological representations, time-course, and neural oscillation mechanisms in EEG experiments. Together, this project provides empirical evidence of personality as a modulation mechanism in error processing under uncertainty, and offers practical implications in promoting human environmental adaptation and goal achievement.

Keywords: error processing, uncertainty, personality, intolerance of uncertainty, cognitive control